

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA DO INVERSOR DE UMA MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA ALIMENTANDO CARGAS TÍPICAS RESIDENCIAIS

Daiana Kasper de Souza – daianakasper@hotmail.com

João Batista Dias – joaobd@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise experimental da qualidade da energia de um inversor de uma microrrede fotovoltaica isolada alimentando cargas típicas residenciais e também compara com a qualidade da energia da rede elétrica da concessionária quando alimenta as mesmas cargas. A microrrede isolada é composta basicamente por 4 módulos fotovoltaicos, sendo 2 conjuntos de diferentes tecnologias monocristalino e multicristalino, um controlador de carga, banco de estocagem com baterias chumbo-ácido de 24 V / 200 Ah e um inversor off-grid de 1000 W. A qualidade da energia é analisada através de medições de energia ativa, reativa e aparente, fator de potência e geração de correntes harmônicas pelo inversor, atendendo diferentes tipos e regimes de cargas. Os resultados mostram que o inversor nesta modalidade de sistema apresenta-se como uma alternativa viável para o para alimentação de cargas residenciais como as testadas neste trabalho, embora em alguns carregamentos o inversor tenha apresentado uma distorção harmônica total de corrente acima das normas referenciadas, muito se deve ao comportamento das cargas nele conectado.

Palavras-chave: Microrrede fotovoltaica; Sistema isolado; Qualidade e produção de energia.

1. INTRODUÇÃO

A energia gerada pelo Sol, considerada inesgotável, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária para o desenvolvimento humano. Seguindo uma tendência que já ocorre em diversas partes do mundo, cada vez mais consumidores brasileiros vão começar a produzir sua própria eletricidade. Esta produção se apresenta como uma das alternativas mais proeminentes para a geração de energia limpa e sustentável, que possam atender regiões de difícil acesso com máxima eficiência, confiabilidade e flexibilidade do sistema a um preço acessível.

A tecnologia solar fotovoltaica possui a versatilidade e flexibilidade para o desenvolvimento do sistema elétrico fora da rede para diferentes regiões, em de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não era economicamente viável. Durante a década de 70, diversos países iniciaram a implantação de sistemas fotovoltaicos para fornecer energia à postos de saúde em zonas rurais, fazer o bombeamento de água, refrigeração, telecomunicação e levar eletricidade a zonas onde as redes de distribuição convencionais não chegavam. Junto com a energia elétrica, chegava o desenvolvimento social e econômico nas mais longínquas comunidades. (MOHANTY et al.,2016)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito experimental, onde um sistema de geração foi instalado no Laboratório de Fontes Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos, situado na cidade de São Leopoldo. O sistema é composto basicamente pelo arranjo de módulos, inversor *off-grid*, controladores de carga com seguidor de máxima potência (SPMP) e banco de baterias, além da unidade de aquisição de dados.

2.1 Componentes da microrrede híbrida fotovoltaica isolada

Tiggemann, Dias e Daí-Prá (2016) mostraram a caracterização e o desenvolvimento de uma microrrede híbrida fotovoltaica na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). A microrrede é basicamente composta pelo arranjo de módulos, baterias que armazenam a energia gerada pelos módulos, inversores, controlador de carga e demais equipamentos listados conforme a Fig. 1.

Equipamento	Quant.	Referência
Módulo fotovoltaico monocristalino - 150Wp	2	HSPV - 150 Wp
Módulo fotovoltaico multicristalino - 135Wp	2	Kyocera modelo KD135SX-UPU
Controlador de carga	2	Tracer - 2210RN
Inversor senoidal Puro - 1000 W	1	Inversor Senoidal SP05 1 kW / 24 V
Bateria selada	8	Bateria Moura 12 V / 50 Ah
Sensor de radiação solar e temperatura	1	Sunny Sensorbox
Controlador Arduino	1	MEGA 2560 R3

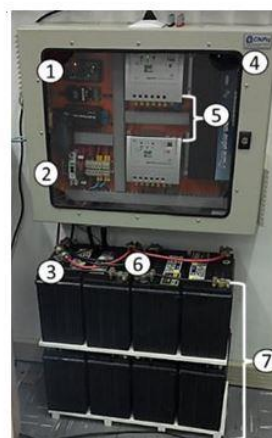


Figura 1- Especificação dos principais componentes da microrrede.

O painel de conversão e controle foi modelado e organizado visando garantir um espaço mínimo entre os componentes e uma troca térmica eficiente. O resultado pode ser visto na Fig. 1. A visualização dos componentes internos pode ser realizada através de uma tampa de acrílico, que também serve como proteção, evitando o contato acidental nos terminais da saída do inversor, com tensão de 220 V, onde os números significam: 1 – Controlador Arduino, 2 - Disjuntor e terminais, 3 - Fusíveis, 4 - Inversor *off-grid*, 5 - Controlador de carga, 6 – Cabos de alimentação, 7- Banco de baterias.

O banco de estocagem possui 8 baterias modelo M50JD, seladas, tipo chumbo ácido de 12 V e 50 Ah, sem necessidade de manutenção, ligadas em quatro ramos em paralelo, sendo cada ramo composto por duas baterias ligadas em série, totalizando um banco com 24 V e 200 Ah de capacidade.

O painel de módulos fotovoltaicos e o banco de baterias estão conectados ao controlador de carga modelo Tracer - 2210RN. Este equipamento faz a conexão entre módulos, baterias e o inversor *off-grid*, gerenciando o processo de carga e descarga do banco de estocagem, além de efetuar o rastreamento do ponto de máxima potência do painel. Este modelo utilizado admite na entrada no máximo 100 V e 520 W, provenientes do painel fotovoltaico, trabalhando com correntes máximas de 20 A para carga e operando com tensão do banco de baterias de até 32 V.

O inversor *off-grid*, modelo Pure Sine Wave, SP05 de 1000 W, recebe energia em c.c. do controlador de carga e a converte em c.a., alimentando diretamente a carga, sem conexão com a rede da concessionária.

O painel da microrrede é formado por 4 módulos, sendo 2 conjuntos de duas tecnologias monocristalino e multicristalino.

2.2 Cargas

A carga que a microrrede pode atender está limitada em 936 W, uma vez que os controladores de carga trabalham com 24 V e corrente máxima de saída de 20 A cada, considerando uma eficiência de 90% para o inversor.

Para monitorar o comportamento da microrrede foram utilizadas cargas resistivas e indutivas afim de possibilitar a avaliação do comportamento de uma residência típica conectada ao sistema isolado e a influência de possíveis distorções no inversor, demais equipamentos e também quanto a qualidade da energia fornecida.

A escolha das cargas relacionadas na Tab. 3, utilizadas para a realização deste estudo, levou em consideração itens usuais em uma residência tendo em vista a potência máxima de 936 W na saída do inversor como fator limitante para testes em cargas de maior potência.

2.3 Medição de dados

Para medição de dados utilizou-se o analisador de energia monofásico Fluke 43B da FLUKE Corporation. Ganha-se eficiência durante a coleta de dados, visto que para um mesmo conjunto de dados coletados é possível verificar a presença de diversos distúrbios ao mesmo tempo. O equipamento foi instalado no laboratório para medição em determinados intervalos de tempo, em média 10 medições por carga instalada. As grandezas mensuradas a cada minuto pelo analisador foram as potências ativa, reativa e aparente, fator de potência, distorção harmônica total e suas componentes de corrente. Este ensaio foi realizado 10 vezes nas mesmas condições para cada grandeza e os valores utilizados para as análises são uma média destas medições.

O equipamento está em conformidade com a diretiva de compatibilidade eletromagnética 89/336/EEC, diretiva de baixa tensão 2006/95/EC, IEC/EN61010-1-2001 e IEC/EN61326-2002, que são normas sobre requisitos de segurança para equipamentos elétricos destinados a medição, controle e uso em laboratório (FLUKE, 2005).

2.4 Qualidade de energia

Há algumas décadas atrás, a qualidade de energia elétrica estava normalmente associada apenas à continuidade de serviço, isto é, a duração e número de interrupções de tensão constatadas pelos consumidores. No entanto, hoje em dia,

para além deste conceito, a qualidade da energia está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer e afetar o desempenho do sistema elétrico indistintamente tanto as companhias de fornecimento de energia como os consumidores e fabricantes de equipamentos, pois as harmônicas circulam nas redes, causando problemas técnicos e financeiros como sobrecargas nos condutores, sobrecarga e envelhecimento de geradores, transformadores e mau funcionamento de equipamentos. Embora o presente esteja centrado em uma microrrede isolada, adotou-se como referência a qualidade da energia, conforme a norma ABNT NBR 16149:2013 (Tabelas 1 e 2), que no Brasil regulamenta inversores para conexão à rede e estabelece parâmetros como faixas de variação de tensão e frequência, *THDi* - Total Harmonic Distortion Current (Distorção Harmônica Total de Corrente), proteção contra ilhamento, fator de potência, entre outros.

Tabela 1 - Limite de conteúdos harmônicos de corrente

Tipo de harmônica	Ordem da harmônica	Limite de distorção
Harmônicas ímpares	3 ^a a 9 ^a	< 4 %
	11 ^a a 15 ^a	< 2 %
	17 ^a a 21 ^a	< 1,5 %
	23 ^a a 33 ^a	< 0,6 %
Harmônicas pares	2 ^a a 8 ^a	< 1 %
	10 ^a a 32 ^a	< 0,5 %
THDi		5%

Fonte: Adaptado de NBR 16149 (2013)

Tabela 2 - Valor do Fator de Potência em função da potência geradora instalada

Potência do sistema FV	Fator de potência do inversor	Tolerância	Observação
Até 3 kW	1	0,98 indutivo a 0,98 capacitivo	---
Superior a 3 kW até 6 kW	1	0,98 indutivo a 0,98 capacitivo	FP pode chegar até 0,95, conforme curva de carregamento do inversor
Maior que 6 kW	1	0,98 indutivo a 0,98 capacitivo	FP pode chegar até 0,9, conforme curva de carregamento do inversor

Fonte: Adaptado de NBR 16149 (2013)

Unidades consumidoras conectadas à rede da concessionária devem atender a padrões de qualidade de energia, estabelecidos na legislação. A Resolução Normativa nº 414, 9 de setembro de 2010 da ANEEL, estabelece que o fator de potência mínimo das unidades consumidoras do grupo A e B deve ser no mínimo 0,92, indutivo ou capacitivo. O fator de potência também é abordado nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST, módulo 8, determinado por ANEEL (2017).

Distorção Harmônica

As harmônicas são componentes de frequência, em tensão ou corrente alternadas de forma senoidal, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede. No caso do sistema elétrico brasileiro, a frequência fundamental é 60 Hz, tendo como 2º harmônico uma onda senoidal de 120 Hz, 3º harmônico uma onda senoidal de 180 Hz e consecutivamente. (PIRES, 2010). A forma matemática de analisar a distorção de uma onda é feita por meio da decomposição de tal onda, utilizando a série de Fourier, seja ela de corrente ou tensão. O índice utilizado para mensurar a quantidade de harmônicos presentes em uma onda, ou seja, o quão distorcida uma onda está em relação a uma onda senoidal é o THD (Total Harmonic Distortion). A distorção harmônica é proveniente principalmente da operação de dispositivos e cargas não lineares na rede elétrica (SIDAQEE, 2016).

3. METODOLOGIA E ANÁLISE

Acompanhar e avaliar a qualidade da energia fornecida

Para acompanhar e avaliar a qualidade da energia empregou-se o analisador Fluke e avaliou-se o comportamento das cargas quanto a sua distorção harmônica, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência na energia fornecida às cargas pelo inversor e quando as mesmas foram alimentadas pela rede da concessionária. O nível de carregamento do inversor da microrrede foi dado através da relação entre a potência da carga e a potência nominal do inversor, conforme ilustra a Tab. 3.

Tabela 3 – Carregamento do inversor *off-grid*

Equipamento	Potência Medida (W)	Potência do inversor (W)	Carregamento (%)
Liquidificador	220	936	25
Sanducheira	710		75
TV	30		3
Extrator de Sucos	139		15
Ventilador	40		5

Inicialmente foi verificado se o banco de baterias estava plenamente carregado para a uniformidade das medições. Nos experimentos realizados através da microrrede a carga foi conectada a uma régua de tomadas alimentadas pela saída do inversor. Entre a alimentação e a carga foi instalado o analisador de energia, conforme ilustra a Fig. 2(a). Em um segundo momento utilizou-se as mesmas cargas para coletar as mesmas grandezas, desta vez utilizando a rede da concessionária RGE Sul, representada na Fig. 2(b). O objetivo desta coleta de dados é posteriormente confrontar a qualidade de energia fornecida pelo inversor da microrrede fotovoltaica e a fornecida pela rede da concessionária.

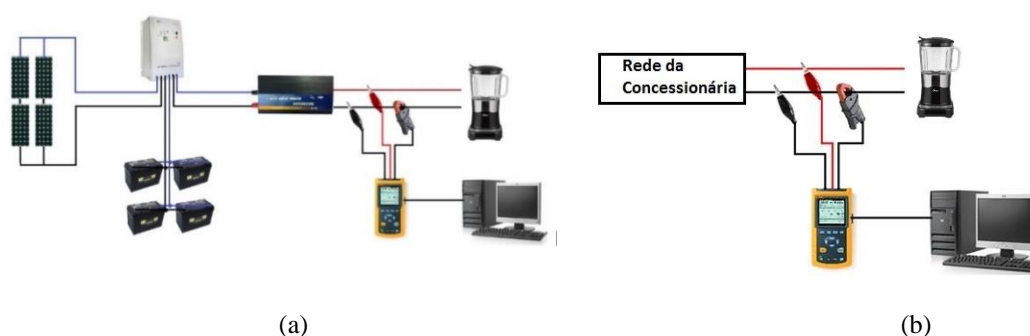


Figura 2 - Medições de potências e harmônicas com cargas (a) no inversor da microrrede e (b) conectadas à rede da concessionária

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa, a microrrede operou atendendo diferentes tipos de carga por diferentes períodos. As medições são apresentadas aos pares de acordo com a carga utilizada, pois os parâmetros elétricos foram mensurados na saída do inversor, e após os experimentos foram repetidos, alimentando as mesmas cargas através da rede da concessionária, conforme ilustra a Fig. 3.

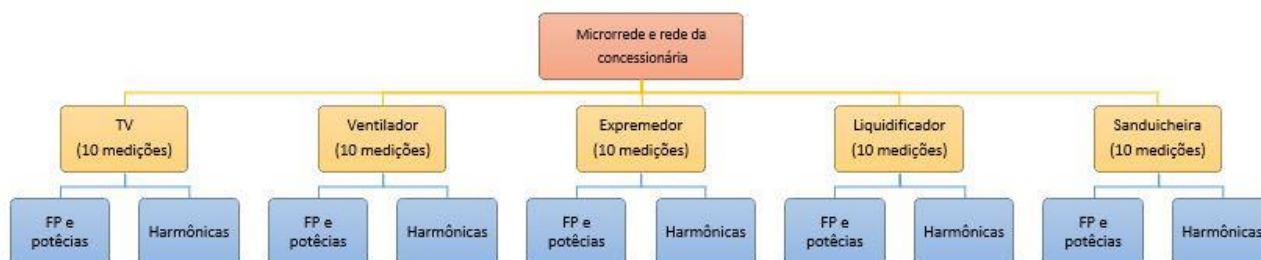


Figura 3 - Cargas e parâmetros mensurados através da microrrede e da rede da concessionária

4.1 Inversor da microrrede com 3% de carregamento

A carga quando conectada ao inversor, conferiu 3% do seu carregamento ao longo de 10 medições. Esta operação foi realizada 10 vezes e os valores apresentados são a média dos resultados.

Potências e Fator de Potência

No primeiro teste, foram realizadas as medidas com uma TV nas duas situações, conectada ao inversor da microrrede Fig. 4(a) e conectada à rede da concessionária Fig. 4(b).

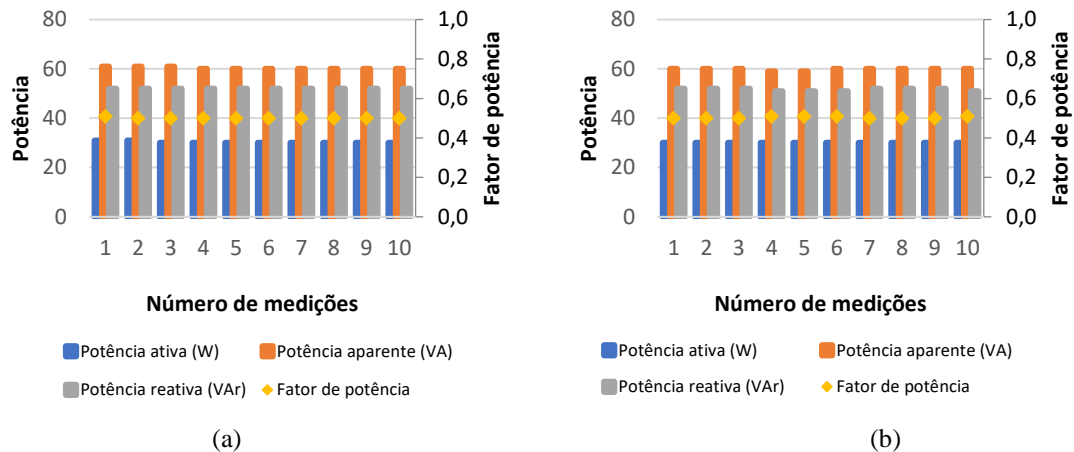


Figura 4 - Potências e FP do (a) inversor (3% de carregamento) e (b) rede da concessionária

Na Fig. 4(a) nota-se que o inversor apresentou baixo fator de potência, fora das recomendações da ABNT (2013) e Aneel (2013), e o mesmo ocorreu com o teste feito com a rede concessionária. O baixo fator de potência revela valores de potência reativa e aparente elevados em relação a potência ativa, que podem ocasionar consequências a longo tempo, para o sistema elétrico como acréscimo das perdas, aumento da temperatura e diminuição da vida útil em cabos.

Harmônicas

A Fig. 5(a) mostra o perfil das correntes harmônicas múltiplas ímpares até a 9ª ordem na saída do inversor e a Fig. 5(b) o perfil das mesmas correntes harmônicas, porém na rede da concessionária.

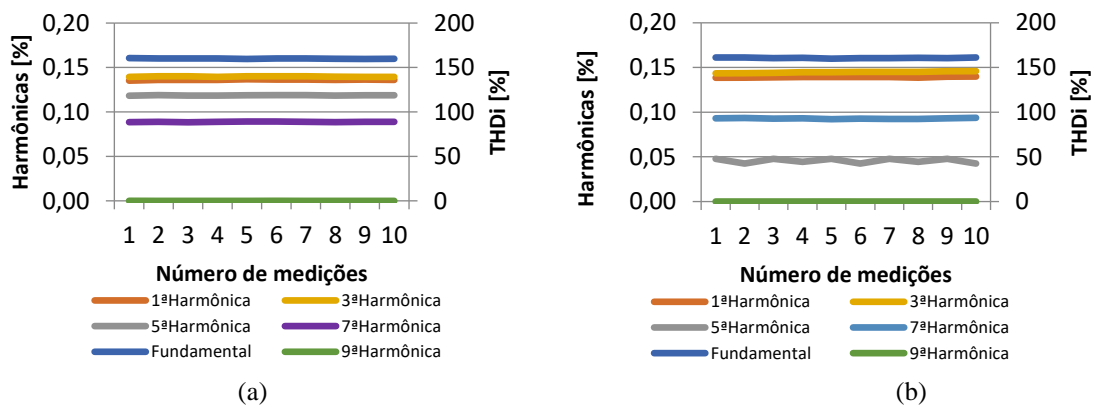


Figura 5 - Harmônicas de 3º, 5º, 7º e 9º ordem e THDi do (a) inversor e (b) rede da concessionária

Observa-se na Fig. 5(a) que através do inversor da microrrede, o THDi teve média de 160,00%. Já Fig. 5(b) através da rede da concessionária, o THDi teve média de 160,75%, nos instantes de medição. Ambos cenários foram comparados com parâmetros citados em normas técnicas, tais como a NBR 16149, IEEE 1574 e IEC 61727, que estabelecem a distorção harmônica total de no máximo 5%. Rampinelli e Krenzinger (2011) apresentaram em seu estudo que os primeiros harmônicos ímpares são os principais responsáveis pelos níveis de distorção harmônica. Pires (2010), abordou a qualidade de energia em diversos aparelhos eletrodomésticos presentes em consumidores residenciais a fim de caracterizar a produção de correntes harmônicas de cada aparelho. Os equipamentos eletrônicos medidos (TV, rádio e computador) apresentaram alta produção de harmônicos, com THD médio de corrente de 100%. Atribui-se estes valores ao perfil de cargas não lineares que devido ao processo de conversão c.a./c.c empregado em suas fontes de alimentação. Concluiu-se que os aparelhos de maior potência em cargas típicas residenciais são cargas lineares, e constata-se uma correlação inversa entre a potência dos aparelhos e a distorção de corrente.

4.2 Inversor da microrrede com 5% de carregamento

Na sequência, os mesmos parâmetros foram aplicados alimentando-se um ventilador como carga típica, conferindo um percentual de carregamento de 5%.

Potências e Fator de Potência

Na Fig. 6(a) observa-se que em ambos, as potências ativa e aparente foram praticamente iguais entre si e a potência reativa apresentou valores mais baixos, devido ao elevado fator de potência, próximo de 1. Na Fig. 6(b) pode-se verificar que as curvas das potências ativa e aparente apresentam valores maiores em relação a mesma carga atendida pelo inversor da microrrede. Esta diferença se deve a tensão de saída da microrrede ser um pouco menor do que a tensão da rede da concessionária, no momento do ensaio.

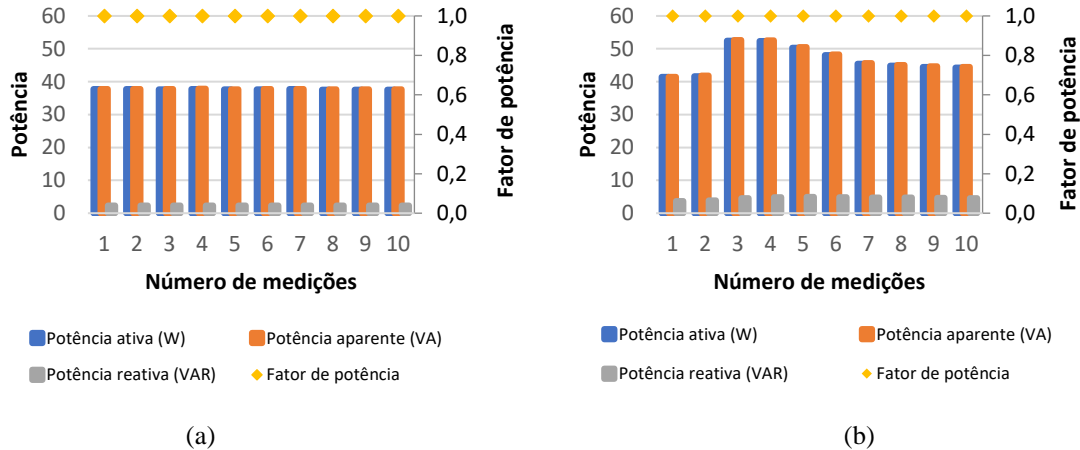


Figura 6 - Potências e FP do (a) inversor (5% de carregamento) e (b) rede da concessionária

Durante o período analisado o fator de potência manteve-se praticamente constante, e dentro das recomendações de ABNT (2013) e Aneel (2013), que apesar de tratarem de instalações conectadas à rede, foram também atendidas por um sistema em modo isolado.

Harmônicas

A Fig. 7(a) traz o perfil do THDi na saída do inversor e a Fig. 7(b) o THDi do ventilador quando alimentado através da rede da concessionária.

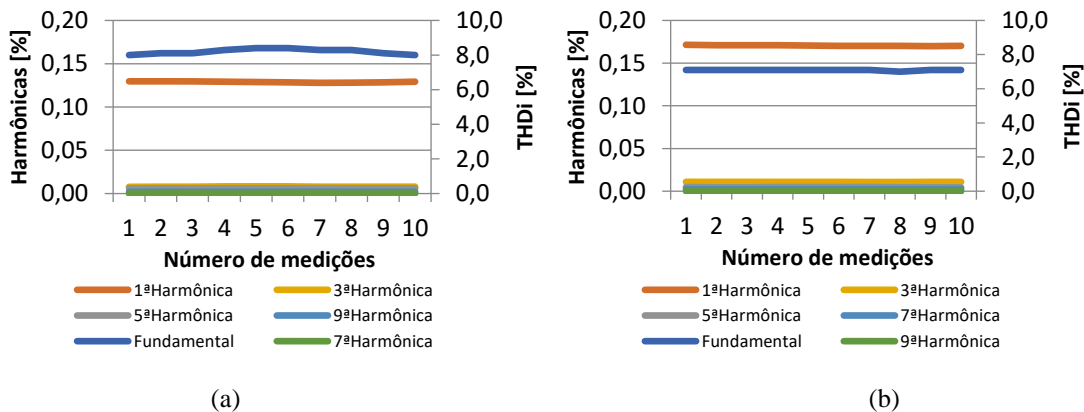


Figura 7 - Harmônicas de 3º, 5º, 7º e 9º ordem e THDi do (a) inversor e (b) rede da concessionária

Observa-se que em ambas as configurações, as harmônicas apresentaram pouca oscilação, sendo a 1ª harmônica a de maior valor, próximo dos 0,1% no inversor da microrrede e 0,2% na rede da concessionária. Percebe-se na Fig. 7, em ambos os casos, que as correntes harmônicas múltiplas ímpares até a 9ª harmônica estão dentro da faixa estabelecida pelas normas, que devem ser inferiores a 4%. Nota-se que o valor de distorção harmônica fundamental, detalhado na Tab. 3, ficou elevado para este equipamento nas duas situações apresentadas. Através da rede da concessionária o THDi teve média de 7,10%, nos instantes de medição, já através do inversor da microrrede, o THDi teve média de 8,20%. Ambos cenários foram comparados com parâmetros citados em normas técnicas que estabelecem a distorção harmônica total de no máximo 5%. Podemos atribuir estes resultados, como no ensaio anterior, ao baixo carregamento do inversor e ao perfil da carga instalada.

4.3 Inversor da microrrede com 15% de carregamento

Neste ensaio alimentou-se um extrator de sucos, representando uma carga típica indutiva conectada ao inversor da microrrede. A Fig. 8(a) traz o perfil das potências e do fator de potência na saída nesta condição.

Potências e Fator de Potência

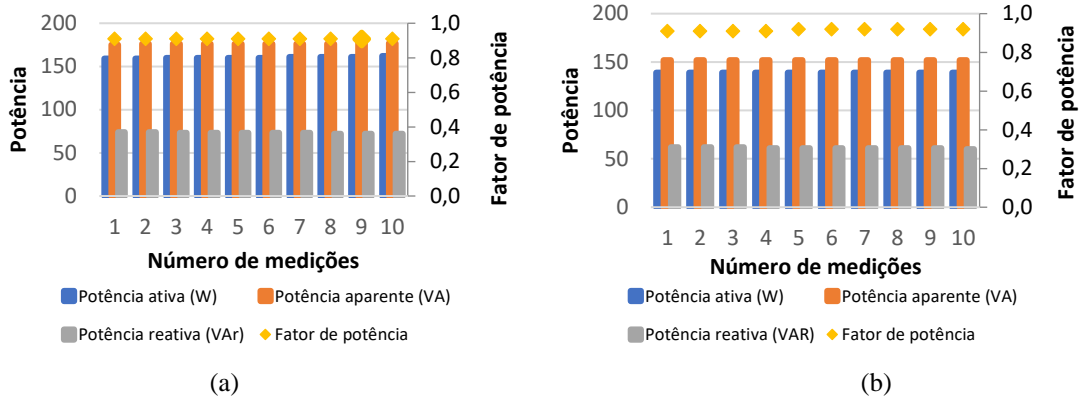


Figura 8 - Potências e FP do (a) inversor (15% de carregamento) e (b) rede da concessionária

Observa-se na Fig. 8(a) que o inversor apresentou fator e potência próximo de 1, porém não acima de 0,92, conforme estabelece o PRODIST (2017). A potência reativa manteve-se abaixo dos 70 VAR, e a potência ativa manteve-se com valores acima dos 150 W. Alimentando-se a carga através da rede da concessionária, os parâmetros elétricos mantiveram-se semelhantes, registrando fator de potência constante e próximo de 0,92, potência ativa próxima a potência aparente e potência reativa acima dos 50 VAR. O comportamento do inversor foi semelhante ao apresentado pela rede da concessionária, exceto pelo fator de potência que ficou abaixo do limite estabelecido. Rampinelli, Dias, Krenzinger (2008), também verificaram um comportamento semelhante, observando baixo fator de potência com baixa carga no inversor e fator de potência próximo de 1, com carregamento acima de 20%.

Harmônicas

A Fig. 9(a) estabelece o perfil do THDi na saída do inversor e a Fig. 9(b) o THDi da mesma carga, alimentada através da rede da concessionária.

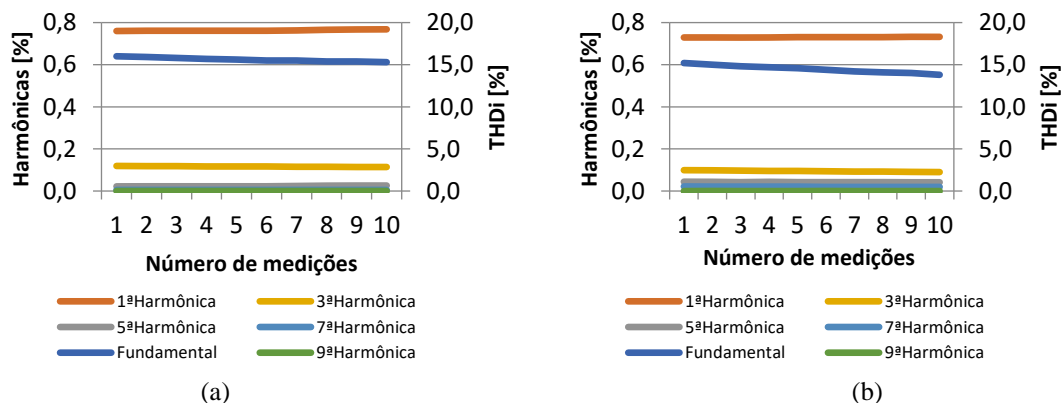


Figura 9 - Harmônicas de 3º, 5º, 7º e 9º ordem e THDi do (a) inversor e (b) rede da concessionária

Verifica-se que na Fig. 9(a) as harmônicas de ordem ímpar apresentaram pouca oscilação sendo a 1ª harmônica a mais relevante, com valor de aproximadamente 0,80% para o inversor da microrrede. Percebe-se na Fig. 9(b), que a rede da concessionária apresentou oscilações nas múltiplas harmônicas e também na 1ª harmônica teve valor aproximadamente de 0,70%. Em ambos os cenários, o comportamento está fora dos limites estabelecidos de 5% de distorção, recomendado em ABNT (2013), IEEE (2003) e IEC (2004). Cabe citar o trabalho de Urbanetz (2010), onde observou-se que o conteúdo harmônico da corrente fornecida pelo inversor é fortemente influenciado pelas cargas não lineares presentes no circuito elétrico. Em Rampinelli e Krenzinger (2011) também se verificou elevados níveis de harmônicos em inversores operando com baixo carregamento.

4.4 Inversor da microrrede com 25% de carregamento

Neste ensaio alimentou-se um liquidificador, representando uma possível carga típica conectada à microrrede isolada e a rede da concessionária.

Potências e Fator de Potência

Observa-se na Fig. 10(a) que o inversor da microrrede apresenta fator de potência próximo de 1, conforme estabelece o PRODIST (2017). A potência reativa manteve-se abaixo dos 40 VAR, e a potência ativa manteve-se em média

240W. Alimentando-se a carga através da rede da concessionária, Fig. 10(b), os parâmetros elétricos mantiveram-se semelhantes, registrando-se fator de potência com pequenas oscilações, no entanto dentro dos limites estabelecidos pelas normas. Durante o período analisado o fator de potência manteve-se dentro das normas.

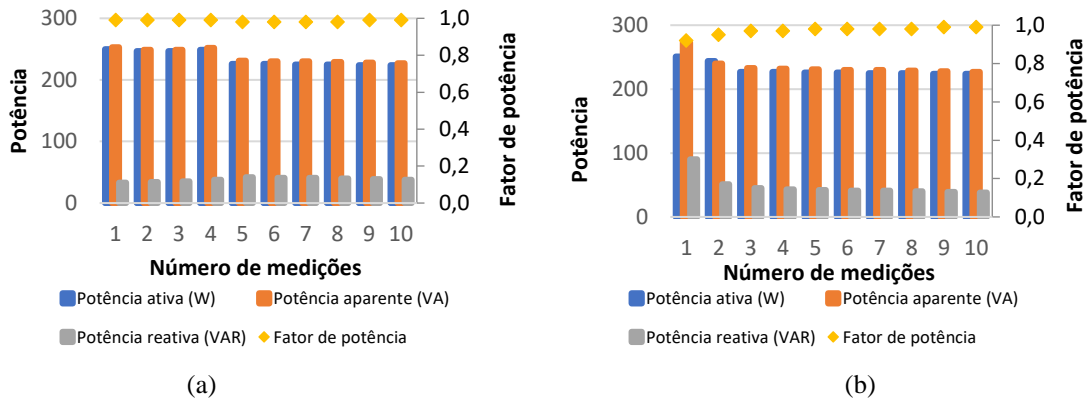


Figura 10 - Potências e FP do (a) inversor (25% de carregamento) e (b) rede da concessionária

Harmônicas

Observa-se na Fig. 11 que em ambas as configurações, as harmônicas apresentaram pouca oscilação, sendo a 1ª harmônica a de maior valor, próximo de 1% e que em ambos os cenários, a distorção de correntes harmônicas foi próxima de 10%. Consta-se que os elevados níveis de distorção harmônica são ocasionados prioritariamente pela característica da carga indutiva. Através da rede da concessionária, o THDi teve média de 8,80%, nos instantes de medição, já através do inversor, o THDi teve média de 9,90%, verificando uma proximidade nos valores, constatando-se um comportamento fora dos limites estabelecidos, recomendado em ABNT (2013).

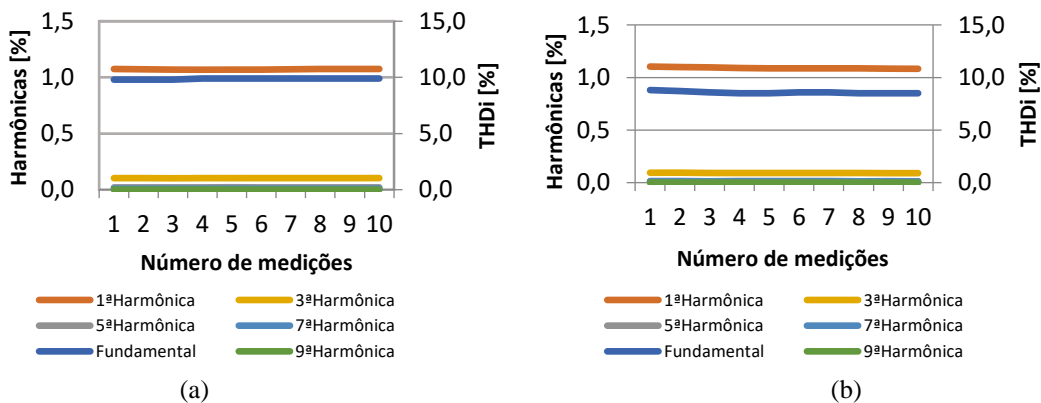


Figura 11 - Harmônicas de 3º, 5º, 7º e 9º ordem e THDi do (a) inversor e (b) rede da concessionária

4.5 Inversor da microrrede com 70% de carregamento

Potências e Fator de Potência

A Fig. (12a) ilustra os resultados da sanduicheira conectada ao inversor, conferindo 70% do seu carregamento ao longo das medições e a Fig. (12b) a mesma carga conectada à rede da concessionária.

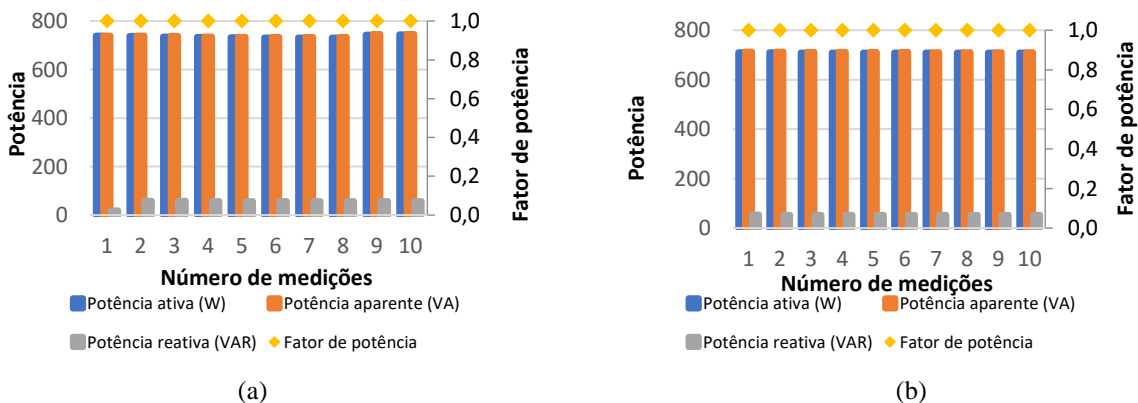


Figura 12 - Potências e FP do (a) inversor (70% de carregamento) e (b) concessionária

Observa-se na Fig. 12 que os valores medidos ficaram bem semelhantes quando a carga foi alimentada pelo inversor da microrrede e pela rede concessionária. Observa-se na Fig. 12(a) que o inversor da microrrede apresenta fator de potência próximo de 1, conforme estabelece o PRODIST (2017). Alimentando-se esta carga através da rede da concessionária os parâmetros elétricos mantiveram-se semelhantes, a potência reativa manteve-se abaixo dos 70 VAR, e a potência ativa manteve-se muito próxima da potência aparente. Durante o período analisado o fator de potência ficou dentro das normas estabelecidas para este estudo.

Harmônicas

O último teste realizado, Fig. 13(a), o inversor da microrrede alimenta novamente a sanduicheira, obtendo-se 70% de carregamento no inversor, durante o mesmo período, e a Fig. 13(b) através da rede da concessionária.

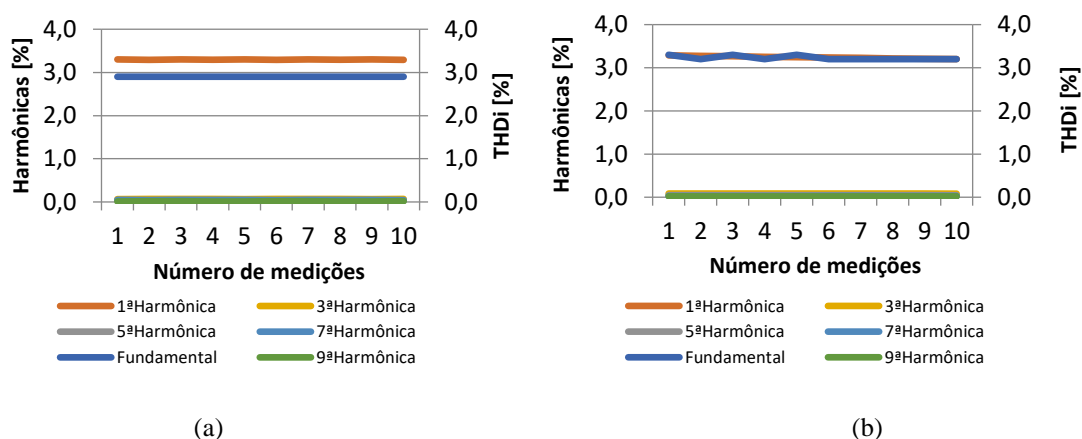


Figura 13 - Harmônicas de 3º, 5º, 7º e 9º ordem e THDi do (a) inversor e (b) concessionária

Observa-se na Fig. 13 que em ambas as configurações, oscilações nas harmônicas de multiplicidade ímpar foram quase nulas, sendo a 1ª harmônica a de maior valor, próximo de 3,2% no inversor da microrrede e 3,3% na rede da concessionária. Percebe-se que em ambos os casos a distorção harmônica fundamental também apresentou valores médios próximo de 3%. Através da rede da concessionária, o THDi teve média de 3,20%, nos instantes de medição, já através do inversor da microrrede, o THDi teve média de 2,30%, verificando uma proximidade nos valores. Constata-se um comportamento semelhante com Macêdo e Zilles (2005), onde o THDi permaneceu abaixo de 5% a partir de 38% de carregamento do inversor.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma análise experimental do inversor de uma microrrede fotovoltaica isolada alimentando cargas típicas residenciais, sendo este tipo de sistema utilizado para fornecimento de energia em locais remotos. Este estudo foca na análise de cargas conectadas ora ao inversor ora a rede da concessionária, visando caracterizar e analisar a qualidade da energia elétrica fornecida às cargas pelos dois sistemas.

Após a realização dos experimentos, observou-se que o comportamento do inversor da microrrede isolada foi semelhante a rede da concessionária para o perfil de cargas instalado, mostrando-se uma alternativa tecnicamente viável na geração de energia elétrica para o atendimento de cargas residenciais. Em testes realizados com equipamentos similares (refrigerador, lâmpadas, TV, liquidificador e etc.), foram observados efeitos semelhantes aos das medições apresentadas neste trabalho.

Em referência aos indicadores de qualidade de energia, o inversor apresentou bons indicadores, durante o atendimento de diferentes cargas, principalmente com carregamento acima de 50%. O fator de potência do inversor manteve-se na maioria das medições praticamente unitário. Este comportamento foi similar quando as mesmas cargas foram atendidas pela rede da concessionária. Já o THDi e as correntes harmônicas múltiplas obtiveram comportamento similar tanto atendida pelo inversor quando pela rede da concessionária, tendo sempre a primeira harmônica como relevante. Quanto a eficiência do inversor, percebe-se que o baixo carregamento influencia diretamente no aumento de distorção harmônica total de corrente nas cargas aplicadas. Enquanto alimentadas pelo inversor, 80% das cargas analisadas apresentaram fator de potência dentro dos valores estabelecidos por norma e consumiram mais energia ativa do que em relação aos valores encontrados quando alimentadas através da rede da concessionária.

Conclui-se que o inversor nesta modalidade de sistema apresenta-se como uma alternativa viável para o para alimentação de cargas residenciais como as testadas neste trabalho, embora em alguns carregamentos o inversor tenha apresentado uma distorção harmônica total de corrente acima das normas referenciadas anteriormente, muito se deve ao comportamento das cargas nele conectado. É importante salientar que este mesmo comportamento foi observado quando estas cargas foram alimentadas pela rede da concessionária.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 01 de janeiro de 2017. Acesso em: 21 abr. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16149/2013: Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição de sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. 12p.
- FLUKE. Power quality analyzer Fluke 43B. User's manual. 2 rev. Netherlands, 2005. Disponível em: <http://assets.fluke.com/manuals/43b_umeng0200.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2017.
- IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61727:2004 - Photovoltaic (pv) systems - characteristics of the utility interface. Acesso em: 09 jan. 2017.
- IEEE - INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE 1547TM:2003 - Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric. Acesso em: 09 jan. 2017.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização da Qualidade Industrial: Portaria nº 04, de 4 de janeiro de 2011. Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica. Disponível: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001652.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2017.
- MACÊDO, Wilson Negrão; ZILLES, Roberto. Qualidade de energia da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede na USP: Avaliação dos parâmetros de suprimento. In: VI Congresso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. (VI CLAGTEE), 2005, São Pedro-SP. Acesso em: 15 dez. 2016.
- MOHANTY; P., MUNEEER; T., KOLHE, M. Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification 1.ed. New York: Springer International Publishing Switzerland, 2016. Acesso em: 13 maio. 2017.
- PIRES, Igor Amariz. Cenários harmônicos em cargas residenciais e comerciais –Transformadores Revista O setor elétrico, Edição 55, agosto de 2010. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/2016/wp-content/uploads/2010/09/Ed55_fasc_harmonicos_capVIII.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2017
- RAMPINELLI, G. A.; DIAS, J. B.; KRENZINGER, A. Ensaio de inversores para conexão à rede: Fator de potência e distorção harmônica. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008, Florianópolis. Acesso em: 20 fev. 2017.
- RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. Estudo da Qualidade da Energia Elétrica Injetada à rede por Inversores utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. Revista AVERMA - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 15, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/G_Rampinelli/publication/267212467>. Acesso em: 05 dez. 2016.
- TIGGEMANN, H.; DIAS, J. B.; DAI-PRÁ, L. B. Monitoring and remote control of a hybrid photovoltaic microgrid. Int. Journal of Engineering Research and Application, Vol. 6, Issue 7, (Part -1) July 2016, pp.74-78.
- URBANETZ, J. J. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros Que Possam Afetar a Conectividade. 2010. 189 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010. Acesso em: 19.maio 2017.
- SIDAQEE, Projeto. Qualidade da Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade. Universidade Federal de Uberlândia - Departamento de Engenharia Elétrica. Acesso em: 14 jun. 2016.

ANALYSIS OF THE ENERGY QUALITY OF THE INVERTER OF A PHOTOVOLTAIC MICROGRID ISOLATED FEEDING TYPICAL RESIDENTIAL LOADS

Abstract. *This work presents an experimental analysis of the energy quality of an inverter of an isolated photovoltaic microgrid feeding typical residential loads and also compares with the power grid quality of the utility when it feeds the same loads. The isolated system consists of 4 PV modules, consisting of 2 arrays of different monocrystalline and multicrystalline technologies, load controller, 24 V / 200 Ah, lead-acid storage bank and an 1000 W off-grid inverter. The quality of the energy is analyzed through measurements of active, reactive and apparent energy, power factor and harmonic currents generation by the inverter and monitored taking care of different types and load regimes. The results show that the inverter is able to handle the load reliably, with quality very close to the energy produced in the power grid and mainly within the pre-established norms. It is concluded that the inverter in this modality of system is presented as a viable alternative for the power supply of residential loads like those tested in this work, although in some loads the inverter has presented a total harmonic distortion of current above the standards referenced previously, much is due to the behavior of the loads connected to it.*

Key words: Photovoltaic microgrid; Isolated system; Quality and energy production.